

На правах рукописи

Юнусова Азалия Назымовна

**ФОТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЛАЗЕРНАЯ
ГЕНЕРАЦИЯ В КРИСТАЛЛАХ SrAlF_5 ,
СОАКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Ce^{3+} и Yb^{3+}**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань — 2014

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии
ФГАОУВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный
руководитель: доктор физико-математических наук, в.н.с. НИЛ
Магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники
им. С.А. Альтшулера Института физики ФГАОУВПО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Семашко Вадим Владимирович

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики Мордовского
государственного университета им. Н.П. Огарева
Рябочкина Полина Анатольевна

кандидат физико-математических наук,
с.н.с. отдела дифракционной оптики ОАО «НПО
«Государственный институт прикладной оптики»
Любимов Александр Иванович

Ведущая
организация: Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН

Защита состоится 19 июня 2014 г. в 14 ч. 40 мин. на заседании
диссертационного совета Д.212.081.07 при ФГАОУВПО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань,
ул. Кремлевская, д.16, Институт физики.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И.
Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета
(Казань, Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена на официальных
сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ (vak2.ed.gov.ru) и
Казанского (Приволжского) федерального университета (kpfu.ru).

Автореферат разослан ____ апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
д.ф.-м.н., профессор



Камалова Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время лазерное излучение может быть получено практически в любом участке спектра — от вакуумно-ультрафиолетового (ВУФ) до среднего инфракрасного (ИК) диапазонов. При этом ультрафиолетовый диапазон (УФ) является наименее освоенным. По этой причине поиск новых активных сред УФ лазеров с практически значимыми свойствами остается актуальным. К числу таких свойств относится возможность перестройки частоты лазерной генерации, высокая мощность и качество излучения (пространственные характеристики пучка), простота эксплуатации и низкая стоимость. Все эти требования не удается удовлетворить, используя традиционные способы получения перестраиваемого когерентного УФ излучения с применением нелинейного или параметрического преобразования частот лазеров других диапазонов спектра. Между тем существует принципиальная возможность создания УФ лазеров на основе межконфигурационных $4f^{n-1}5d-4f^n$ переходов трехвалентных редкоземельных ионов, активированных в широкозонные диэлектрические кристаллы. Построенные на этом принципе лазеры обеспечивают перестройку частоты лазерной генерации и обладают всеми преимуществами твердотельных лазеров. Несмотря на это, число серийных лазеров, реализующих данный подход, до сих пор крайне мало [1]. Причина заключается в том, что высокая энергия накачки индуцирует в активных средах различные паразитные фотодинамические процессы, которые приводят к значительному ухудшению лазерных характеристик УФ активных сред или даже исключают возможность возбуждения УФ лазерного излучения. Именно поэтому комплексное исследование спектрально-кинетических, фотохимических, диэлектрических, усилительных и лазерных свойств новых сред на основе активированных фторидных кристаллов, использующих в качестве рабочих межконфигурационные $4f^{n-1}5d-4f^n$ переходы редкоземельных ионов, является актуальным как с фундаментальной, так и практической точек зрения.

Объектами данного исследования являются широкозонные диэлектрические кристаллы SrAlF_5 (далее SAF), активированные ионами Ce^{3+} (Ce:SAF) и Yb^{3+} (Ce,Yb:SAF). Известно, что кристаллы Ce:SAF имеют

близкий химический состав к наиболее эффективным УФ активным материалам — $\text{Ce}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiSaAlF}_6$ (см., например, обзор [1]) и характеризуются широким спектром люминесценции, что позволяет ожидать широкую область перестройки частоты лазерной генерации [2]. Помимо этого они предположительно обладают сегнетоэлектрическими и нелинейными свойствами (см., например, [3]), которые открывают возможность создания активной среды с управляемыми оптическими характеристиками.

Цель диссертационной работы заключается в определении перспективности использования кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ в качестве активных сред УФ лазеров на основе межконфигурационных переходов ионов Ce^{3+} . Данная цель достигалась путем комплексного исследования спектрально-кинетических, фотохимических, фотодиэлектрических, усилительных и лазерных свойств этих кристаллов, в частности в работе представлены:

- спектрально-кинетические исследования кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ в УФ и ИК области спектра;
- исследования характеристик усиления $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ методами «pump-probe» спектроскопии и проведение тестов, направленных на достижение в них лазерной генерации;
- исследование фотодинамических процессов, возникающих в кристаллах $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ под воздействием интенсивной накачки.

Научная новизна:

1. В работе характеризуется новый кристаллический материал, пригодный для использования в устройствах квантовой электроники и фотоники ВУФ и УФ диапазонов спектра. Впервые изучены спектрально-кинетические, усилительные, фотохимические свойства активированных кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ в контексте реализации в них УФ лазерной генерации на $5d-4f$ переходах ионов Ce^{3+} .

2. Для уменьшения деградации оптических свойств кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ в результате индуцированных излучением накачки процессов образования центров окраски впервые предпринята попытка их подавления кристаллохимическим способом, который заключается в соактивации

кристаллов Ce:SAF ионами Yb^{3+} . Показано, что такая соактивация приводит к уменьшению коэффициента наведенного накачкой поглощения в кристаллах Ce,Yb:SAF по сравнению с несоактивированными кристаллами Ce:SAF.

3. Впервые получена лазерная генерация на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} в кристаллах SAF при накачке излучением KrF- лазера (длина волны накачки 248 нм).

4. Впервые исследованы нелинейные фотодинамические процессы в Ce:SAF и Ce,Yb:SAF, установлены значения некоторых параметров этих процессов.

Научная значимость и практическая ценность работы:

1. Обнаружена новая активная среда УФ диапазона спектра на основе кристалла Ce:SAF с длиной волны генерации ~ 291 нм, которая может найти применение в качестве рабочих сред лазеров и/или в качестве пассивных устройств квантовой электроники (например, насыщающиеся поглотители УФ диапазона спектра).

2. Получены новые фундаментальные знания о процессах взаимодействия интенсивного излучения УФ накачки с церий-активированными средами. Определены ключевые характеристики этих процессов для кристаллов Ce:SAF и Ce,Yb:SAF.

3. Разработаны новые и усовершенствованы известные методики исследования индуцированных фотодинамических процессов в активных средах УФ диапазона.

Положения, выносимые на защиту:

1. При активации кристаллов SAF ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} формируются четыре оптически неэквивалентных примесных центра, образованных ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} , а также один примесный центр, образованный ионами Yb^{2+} .

2. В кристаллах Ce:SAF возбуждается УФ импульсная лазерная генерация на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} на длине волны ~ 291 нм при использовании в качестве источника накачки излучения KrF-лазера ($\lambda=248$ нм).

3. Основной причиной, препятствующей получению эффективного УФ лазерного излучения на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} в кристаллах SAF,

является образование под действием излучения накачки центров окраски, поглощающих в области частот лазерной генерации.

4. Способ подавления процессов образования центров окраски в кристаллах Ce:SAF путем их соактивации ионами Yb^{3+} не обеспечивает улучшения характеристик лазерной генерации на $5d \rightarrow 4f$ переходах ионов Ce^{3+} из-за перекрывания полос поглощения ионов Ce^{3+} и Yb^{2+} в этих кристаллах.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись на пяти международных конференциях: Международной молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия XI, XIII, XV» (Казань, 2007, 2009 и 2011), Международном симпозиуме «Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare earth and transition metal ions XIV» (Санкт-Петербург, 2010) и XV (Казань, 2013), Международной конференции «International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO) and Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT)» (Москва, 2013).

Достоверность. Исследования проводились с использованием современных апробированных методик и поверенного экспериментального оборудования, обеспечивающих достоверность измерений и повторяемость экспериментальных результатов. Основные результаты настоящей диссертации обсуждались на конференциях различного уровня, опубликованы в ведущих реферируемых журналах. Экспериментальные результаты согласуются с имеющимися литературными данными.

Публикации. Основное содержание работы отражено в девяти публикациях: трех статьях в журналах из перечня ВАК РФ [A1-A3], трех статьях в сборниках конференций [A4-A6] и трех тезисах докладов в сборниках конференций [A7-A9].

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных по теме диссертации; участии в постановке задач и выборе экспериментальных методов, обеспечивающих их успешное решение; проведении основных спектроскопических исследований кристаллов SAF, активированных ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} , анализе и интерпретации экспериментальных данных с применением методов математического

моделирования; обобщении полученных результатов в публикациях. Руководителю работы Семашко В.В. принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задачи исследования, обсуждении методов и результатов исследования, участии в постановке лазерных тестов кристаллов Ce:SAF и Ce,Yb:SAF. Соавторы совместных публикаций Кораблева С.Л. и Марисов М.А. синтезировали исследуемые в работе кристаллы Ce:SAF и Ce,Yb:SAF. Соавтор Сафиуллин Г.М. оказал содействие в проведении исследований спектров возбуждения люминесценции. Соавторы Низамутдинов А.С. и Марисов М.А. участвовали в постановке «pump-probe» экспериментов. Нуртдинова Л.А. и Павлов В.В. оказали содействие в исследовании фотопроводимости.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии, включающей 124 наименования. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 5 таблиц.

Во **введении** кратко обоснованы актуальность темы исследований, их научная и практическая значимость, сформулирована цель диссертационного исследования и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор литературы, обобщающий сведения о физических и структурных характеристиках кристалла SAF; о кристаллохимических особенностях его активации (прежде всего, редкоземельными ионами); о спектроскопических свойствах активированных и неактивированных кристаллов; о фотохимической устойчивости кристалла в условиях УФ облучения и связанных с ним фотодинамических процессах; о лазерных характеристиках исследуемой матрицы при ее активации ионами группы железа. В заключении главы обобщаются расхождения в имеющихся литературных данных и рассматриваются перспективы применения кристаллов SAF в качестве активных сред для приборов квантовой электроники и фотоники УФ диапазона спектра.

Во **второй главе** приведено описание особенностей кристаллического синтеза кристаллов Ce:SAF и Ce,Yb:SAF, основных экспериментальных методик и используемой при их реализации аппаратуры.

В третьей главе представлены результаты спектрально-кинетических исследований кристаллов SAF, активированных ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} . Главу предваряет анализ затрудняющих реализацию лазерной генерации особенностей активации кристаллов SAF трехвалентными редкоземельными ионами и поясняются причины, по которым в работе используется способ подавления процессов образования центров окраски путем соактивации кристаллов ионами Yb^{3+} ; отмечаются как положительные, так и возможные отрицательные последствия такой соактивации.

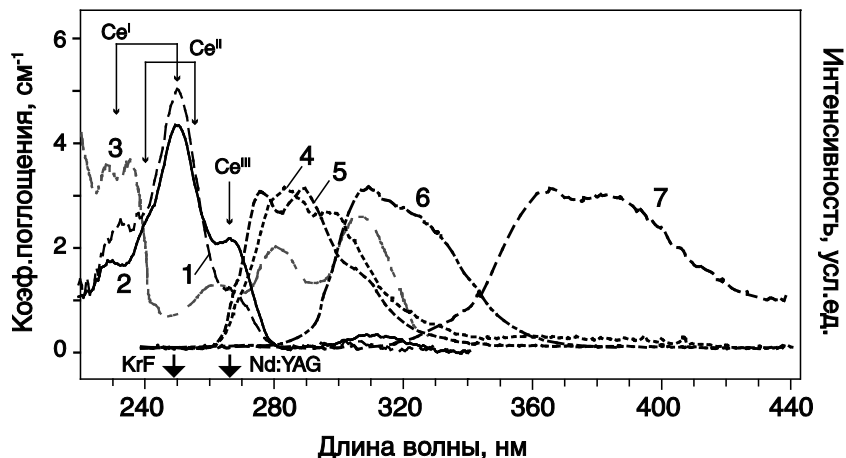


Рис.1. Спектр поглощения кристаллов Ce:SAF (1), Ce,Yb:SAF (2) при $T=300K$ и Yb^{2+} :SAF (3) по данным работы [4] (шкала слева) и спектры люминесценции образующихся в кристалле Ce:SAF различных цериевых центров Ce^I , Ce^{II} , Ce^{III} и Ce^{IV} , возбуждаемых излучением с длинами волн 217 нм (4), 239 нм (5), 266 нм (6) и 300 нм (7) соответственно при $T=77K$ (шкала справа); жирными стрелками отмечены длины волн излучения пригодных для накачки лазерами Nd:YAG (266 нм) и KrF (248 нм); тонкими стрелками отмечены относящиеся к различным оптически неэквивалентным примесным цериевым центрам полосы в спектрах поглощения

В результате исследования установлено, что при активации кристаллов SAF ионами Ce^{3+} образуются четыре оптически неэквивалентных примесных центра. Показано, что, возбуждая $5d \rightarrow 4f$ люминесценцию ионов Ce^{3+} в кристаллах SAF излучением различных длин волн, удастся зарегистрировать спектры люминесценции, соответствующие различным цериевым центрам,

условно обозначенным как Ce^I (соответствующие $5d \rightarrow {}^2F_{5/2}$ и $5d \rightarrow {}^2F_{7/2}$ переходам полосы в спектре люминесценции с максимумами вблизи 279 и 294 нм, рис. 1), Ce^{II} (274 и 287 нм), Ce^{III} (304 и 321 нм) и Ce^{IV} (357 и 379 нм). Суммарный квантовый выход люминесценции для всех наблюдаемых центров составляет $0,95 \pm 0,05$. Установлено, что даже при температуре $T=300K$ обмен энергией между различными цериевыми центрами малоэффективен.

Кроме того, обнаружено, что в дважды активированных кристаллах $Ce,Yb:SAF$, кроме цериевых центров, формируются четыре оптически неэквивалентных центра ионов Yb^{3+} , люминесцирующих в ИК области спектра, и один центр ионов Yb^{2+} , полосы люминесценции и поглощения которого располагаются в УФ области спектра. Показано, что полосы поглощения ионов Yb^{2+} перекрываются с полосами поглощения ионов Ce^{3+} (особенно с полосами Ce^{III} центра) и, как следует из расчета интегральной интенсивности $5d-4f$ люминесценции различных цериевых центров, нормированных на интегральную интенсивность суммарного спектра люминесценции, в исследуемых кристаллах от 20% до 70% энергии накачки расходуется на возбуждение Yb^{2+} ионов.

Анализ спектров $5d \rightarrow 4f$ возбуждения люминесценции кристаллов $Ce:SAF$ и $Ce,Yb:SAF$ позволил интерпретировать спектр $4f \rightarrow 5d$ поглощения ионов Ce^{3+} в образцах (рис. 1) и отнести наблюдаемые полосы поглощения к различным оптически неэквивалентным типам цериевых центров. Исходя из незначительных различий во временах затухания люминесценции всех центров (кроме Ce^{IV}), было установлено, что Ce^I и Ce^{II} центры в кристаллах $Ce:SAF$ и $Ce,Yb:SAF$, полосы поглощения которых наиболее интенсивны, имеют наибольшие концентрации в кристаллах. Эти примесные центры могут эффективно возбуждаться излучением KrF -лазера ($\lambda=248$ нм) и являются наиболее перспективными с точки зрения получения УФ лазерной генерации на кристаллах $Ce:SAF$. Наименьшую концентрацию имеет центр Ce^{IV} . В заключительной части главы представлены результаты исследования фотопроводимости в кристаллах $Ce:SAF$ и $Ce,Yb:SAF$. Показано, что наблюдаемая фотопроводимость обусловлена процессами одно- и двухфотонной ступенчатой ионизации цериевых центров и центров окраски.

Показано, что вероятность фотоионизации активаторных ионов растет с уменьшением длины волны воздействующего излучения. По этой причине для уменьшения вероятности фотохимических превращений в исследуемых образцах и, следовательно, коэффициента наведенного поглощения в области 5d-4f переходов ионов Ce^{3+} следует использовать излучение накачки с максимально возможной длиной волны.

В конце главы приводятся схемы энергетических уровней примесных центров ионов Ce^{3+} , Yb^{2+} и Yb^{3+} в кристаллах Ce:SAF и Ce:Yb:SAF , обсуждаются результаты спектрально-кинетических исследований данной работы и их согласие с имеющимися литературными данными. Показано, что полученные результаты в отношении $\text{Ce}^{\text{I-III}}$ центров не противоречат работе [2], тогда как цериевый центр Ce^{IV} наблюдался автором диссертационного исследования впервые. Подчеркнуты различия в оценках перспективности использования образующихся цериевых центров для достижения эффекта лазерной генерации.

В четвертой главе представлены результаты исследования кристаллов Ce:SAF и Ce:Yb:SAF при воздействии интенсивного лазерного излучения, резонансного 4f-5d переходам ионов Ce^{3+} . Описаны результаты экспериментов, направленных на осуществление лазерной генерации на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} . Оценены параметры некоторых из протекающих в кристаллах фотодинамических процессов.

При поперечной схеме накачки излучением KrF-лазера ($\lambda=248$ нм) в кристаллах Ce:SAF удастся возбудить УФ импульсную лазерную генерацию на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} ($\text{Ce}^{\text{I-III}}$ центры). Установлено, что лазерная генерация с длиной волны ~ 291 нм прекращается после первого импульса накачки. Излучение накачки индуцирует в кристаллах Ce:SAF центры окраски, которые поглощают свет в области лазерной генерации, что приводит к ее прекращению. Смещение накачиваемого объема кристалла либо принудительное обесцвечивание наведенных накачкой центров окраски позволяет получить очередной «однократный импульс» лазерного излучения. Данный результат показывает, что сечение поглощения с возбужденного 5d-состояния ионов Ce^{3+} в кристаллах SAF не превышает сечения вынужденного излучения, а рост потерь, обусловленных поглощением центров окраски в

области 5d-4f переходов ионов Ce^{3+} (Ce^{III} центр), является основным фактором, определяющим неустойчивость лазерной генерации в кристаллах $\text{Ce}:\text{SAF}$. Действительно, как показано на рис.2, в кристаллах $\text{Ce}:\text{SAF}$ в спектре наведенного поглощения в области 250-700 нм имеет место интенсивное поглощение центров окраски, процессы образования которых эффективно подавлены в соактивированных кристаллах $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$. Несмотря на это, возбудить в дважды активированных кристаллах лазерную генерацию при тех же условиях накачки не удастся. Это объясняется

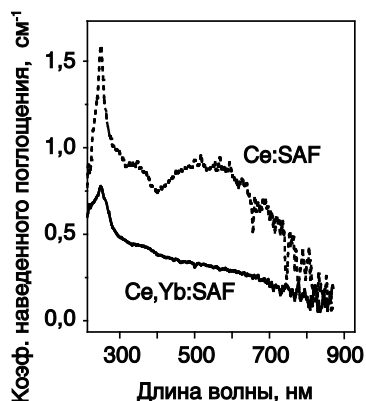


Рис. 2. Спектры наведенного поглощения кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ (1), $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ (2). Длина волны излучения накачки 266 нм. Плотность энергии накачки 0,8 Дж/см². Спектральная поверхностная плотность излучения зондирования менее 1 нДж/см²/нм

$\text{Ce}:\text{SAF}$ ионами Yb^{3+} подавляет процессы образования центров окраски и ускоряет рекомбинацию свободных носителей заряда.

При исследовании пропускания возбужденных кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ методами «pump-probe» спектроскопии в области 5d-4f переходов ионов Ce^{3+} обнаружено противоречие с результатами тестов, направленных на достижение лазерной генерации: так, при накачке в полосы поглощения

неэффективной накачкой Ce^{II} центра в кристаллах $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$, связанной со значительным (от 20 до 70%) поглощением энергии накачки ионами Yb^{2+} . Лазерное излучение в кристаллах $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ при накачке излучением 266 нм, которое обеспечивает преимущественную накачку 5d-состояний примесного Ce^{III} центра, зарегистрировать не удастся.

Исследования спектров наведенного поглощения кристаллов $\text{Ce}:\text{SAF}$ и $\text{Ce},\text{Yb}:\text{SAF}$ позволяют установить, что под действием излучения накачки в кристаллах $\text{Ce}:\text{SAF}$ образуются короткоживущие ($\tau < 100$ мс) и долгоживущие центры окраски ($\tau \sim 100$ мс и более) различной природы.

Показано, что соактивация кристаллов

Ce^{III} наблюдается незначительное усиление зондирующего излучения (до $0,1 \text{ см}^{-1}$), а при накачке в полосы поглощения $\text{Ce}^{\text{I,II}}$ центра — только интенсивное наведенное поглощение. Это несоответствие обусловлено особенностями проведения «pump-probe» экспериментов: центры окраски индуцируются и накапливаются в образцах в процессах юстировки и осуществления измерений, маскируя оптическое усиление на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} .

В этой же главе представлены результаты исследования фотодинамических процессов, приводящих к образованию центров окраски в кристаллах Ce:SAF и Ce,Yb:SAF . Установлено, что образование центров окраски обусловлено ионизацией (одноступенчатой или многоступенчатой) активаторных ионов (ионов Ce^{3+}) квантами излучения накачки и захватом свободных носителей заряда дефектами кристаллической решетки. Ключевыми параметрами фотодинамических процессов, определяющих коэффициент наведенного поглощения, являются сечение ионизации из возбужденного 5d-состояния ионов Ce^{3+} , вероятности процессов рекомбинации свободных носителей заряда, сечение захвата этих зарядов дефектами кристаллической решетки (вероятности образования центров окраски) и вероятности обесцвечивания центров окраски за счет их термо- и/или фотостимулированной ионизации. Наиболее информативным методом исследования этих процессов является анализ зависимости коэффициента пропускания образцов от интенсивностей и длин волн воздействующих излучений. Интерпретация полученных экспериментальных зависимостей осуществлялась с использованием теоретической модели фотодинамических процессов, описанной в [1]. Модель включает в себя четырехуровневую схему лазерного генератора, дополненную переходами из возбужденных состояний в зону проводимости кристаллической матрицы, рекомбинационными процессами и процессами образования и деструкции центров окраски. Часть параметров модели известна с достаточно высокой точностью из литературных данных и результатов исследований спектрально-кинетических характеристик образцов. Остальные параметры явились предметом оптимизационной процедуры, осуществленной таким образом, чтобы обеспечить минимальную невязку между экспериментально

полученными и рассчитанными значениями коэффициента пропускания. Показано, что в кристаллах Ce,Yb:SAF скорости рекомбинации свободных носителей заряда в энергетических зонах матрицы основы и вероятность деструкции центров окраски в несколько раз больше, чем в кристаллах Ce:SAF. Полученные результаты согласуются с современными представлениями об индуцированных излучением фотодинамических процессах в УФ активных средах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В кристаллах Ce:SAF формируются четыре оптически неэквивалентных примесных центра ионов Ce^{3+} , тогда как в кристаллах Ce,Yb:SAF, кроме четырех цериевых центров, образуются четыре оптически неэквивалентных примесных центра ионов Yb^{3+} и один примесный центр ионов Yb^{2+} .

2. Процессы обмена энергией между различными цериевыми центрами в исследуемых кристаллах малоэффективны при комнатной температуре.

3. Цериевые центры Ce^I и Ce^{II} характеризуются наибольшей относительной концентрацией, поэтому для получения лазерной генерации на 5d-4f переходах иона Ce^{3+} предпочтительно возбуждать именно эти центры, используя в качестве источника накачки излучение, например, эксимерного KrF-лазера с длиной волны генерации 248 нм.

4. Под действием УФ лазерного излучения в кристалле Ce,Yb:SAF возникает фотопроводимость, которая в диапазоне длин волн 240 – 300 нм обусловлена фотоионизацией ионов Ce^{3+} из его возбужденных 5d-состояний, а также ионизацией центров окраски различной природы.

5. При накачке излучением KrF-лазера в кристаллах Ce:SAF реализуется режим УФ импульсной лазерной генерации. Кратковременная лазерная генерация наблюдается на длине волны ~291 нм и прекращается после первого импульса накачки, который индуцирует в кристаллах Ce:SAF процессы образования центров окраски, поглощающих на длине волны генерации. Лазерную генерацию не удастся возбудить при накачке излучением с длиной волны 266 нм.

6. Наблюдение лазерной генерации свидетельствует о том, что поглощение с возбужденного 5d-состояния ионов Ce^{3+} в кристаллах SAF не превышает сечения вынужденного 5d-4f излучения с этих состояний. Таким образом, основная причина затруднений в получении устойчивых усиления и генерации лазерного излучения в кристаллах Ce:SAF заключается в росте потерь, обусловленных поглощением центров окраски в области 5d-4f переходов ионов Ce^{3+} .

7. Установлено, что соактивация кристаллов Ce:SAF ионами Yb^{3+} приводит к существенному снижению коэффициента поглощения центров окраски. Однако этот результат не позволяет существенно улучшить характеристики лазерной генерации на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} из-за перекрывания полос поглощения ионов Yb^{2+} и Ce^{3+} в этих кристаллах.

8. Из экспериментальных зависимостей коэффициента поглощения на длине волны накачки от ее плотности энергии оценены основные параметры фотодинамических процессов в кристаллах Ce:SAF и Ce,Yb:SAF, соответствующих различным длинам волн возбуждения: сечение поглощения из основного состояния ионов Ce^{3+} , сечение ионизации ионов Ce^{3+} из возбужденного 5d-состояния, сечение фотоионизации центров окраски, вероятность деструкции центров окраски, вероятность рекомбинации свободных носителей заряда, вероятность захвата свободных носителей заряда дефектами кристаллической решетки (вероятность образования центров окраски), концентрация центров окраски.

Цитированная литература:

1. Семашко, В.В. Проблемы поиска новых твердотельных активных сред ультрафиолетового и вакуумно-ультрафиолетового диапазонов спектра: роль фотодинамических процессов / В.В. Семашко // ФТТ. – 2005. – т.47. — вып.5. – С.1450-1454.

2. Omelkov, S.I. A luminescence spectroscopy and theoretical study of 4f–5d transitions of Ce^{3+} ions in SrAlF_5 crystals / S.I. Omelkov, M.G. Brik, M.Kirm, V.A. Pustovarov, V. Kiisk, I. Sildos, S. Lange, S.I. Lobanov, L.I.Isaenko // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2011. — V.23. — N.10. — P.105501-105509.

3. Shimamura K. Advantageous growth characteristics and properties of SrAlF_5 compared with BaMgF_4 for UV/VUV nonlinear optical applications / K. Shimamura, E. G. Vllora, K. Muramatsu, N. Ichinose. // Journal of Crystal Growth. – 2005. – V.275 – P. 128-134.

4. Henderson, E.W. Optical properties of RE ions in SrAlF_5 / E.W. Henderson, J.P.Meehan // Journal of Luminescence. – 1974. – V.8. – P. 415-427.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

A1. Юнусова, А.Н. Спектроскопия межконфигурационных $4f \leftrightarrow 5d$ переходов ионов церия в сегнетоэлектрических кристаллах SrAlF_5 / А.Н. Юнусова, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, А.К. Наумов, С.Л. Кораблева, М.А. Марисов, С.А. Кирышева // Учёные записки КГУ – Казань: КГУ. – 2010. – т.152. – кн.3. – с. 199-203

A2. Yunusova, A.N. Spectral-kinetic studies of SrAlF_5 doped by trivalent rare-earth ions / A.N.Yunusova, M.A.Marisov, V.V.Semashko, L.A.Nurtdinova, S.L.Korableva // Optics Communications. –2012. – V. 285 – pp. 3832–3836

A3. Yunusova, A.N. Site-selective spectroscopy of Ce^{3+} and Yb^{3+} ions in double-doped SrAlF_5 crystals / A.N. Yunusova, V.V. Semashko, G.M. Safiullin, L.A. Nurtdinova, V.V. Pavlov, M.A. Marisov // Journal of Luminescence. –2014. – V. 145 – pp. 443–447

A4. Юнусова, А.Н. Спектроскопия межконфигурационных $4f-5d$ переходов ионов церия в сегнетоэлектрических кристаллах SrAlF_5 / А.Н. Юнусова, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, А.К. Наумов, С.Л. Кораблева, М.А. Марисов, С.А. Кирышева // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XIII Международная молодежная научная школа: сборник статей (Россия, Казань, 26-28 октября 2009) – Казань: КГУ. – 2009. – Вып. XIII. – С. 295-298

A5. Юнусова, А.Н. Спектрально-кинетические свойства кристалла SrAlF_5 , активированного ионами трехвалентного церия / А.Н. Юнусова, В.В. Семашко, А.К. Наумов, Р.Ю. Абдулсабиров, С.Л. Кораблева, М.А. Марисов, Д.И. Целищев // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XI Международная молодежная научная школа: сборник статей (Россия, Казань, 25-27 октября 2007) – Казань: КГУ. – 2007. – Вып. XI. – С. 295-298

Аб. Юнусова, А.Н.. Спектроскопия кристаллов SrAlF_5 ,

активированных трехвалентными редкоземельными ионами / В.К. Ягафаров, А.Н. Юнусова, В.В. Семашко, А.К.Наумов, С.Л. Кораблева, Л.А. Нуртдинова, М.А. Марисов // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: XV Международная молодежная научная школа: сборник статей (Россия, Казань, 24-26 октября 2011) – Казань: КГУ. – 2011. – Вып. XV. – С. 182-186

A7. Yunusova, A.N. Laser-related spectroscopy of $\text{Ce}^{3+}:\text{SrAlF}_5$ crystals / A.N.Yunusova, A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko, A.K. Naumov, S.L. Korableva, M.A. Marisov // Abstracts and Program of XIV International Feofilov symposium on spectroscopy of crystals doped with rare earth and transition metal ions, St. Petersburg, Russia October 18-21, 2010. – Th-O-39

A8. Yunusova, A.N. UV laser action in $\text{Ce}^{3+}:\text{SrAlF}_5$ crystal / A.N. Yunusova, V.V. Semashko, G.M. Safiullin, M.A. Marisov // Conference Program and Technical Digest of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO) and Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT) 2013, Moscow, Russia June 18-22, 2013.

A9. Yunusova, A.N. Yb^{2+} and Yb^{3+} optical centers in double-doped $\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{SrAlF}_5$ single crystals / A.N. Yunusova, V.V. Semashko, G.M. Safiullin, M.A. Marisov // Abstracts and Program of XV International Feofilov symposium on spectroscopy of crystals doped with rare earth and transition metal ions, Kazan, Russia September 16-20, 2013. – P.122